



INFLUENCIA DEL ESPESOR Y LA TEMPERATURA EN EL SECADO DE CARAMBOLA (*Averrhoa carambola* L.)

Claudia Hernández Londoño, Zonia Karina Ossa, Lorena Ramírez Perdomo & Wilmer Herrera
Valencia

Artículo recibido el 01 de Agosto de 2011, aprobado para publicación el 05 de Diciembre de 2011.

Resumen

Rodajas de carambola con diferentes espesores (0,5; 1,0 y 1,5 cm) fueron secadas a diferentes temperaturas de bulbo seco (50, 55 y 60 °C), utilizando un deshidratador de bandejas. Se evaluó el efecto de la temperatura y el espesor sobre tiempo de secado, coeficiente de difusión, características fisicoquímicas y análisis proximal del fruto seco. Con los datos obtenidos se construyeron curvas de secado; se observó que el secado tiene lugar durante el periodo descendente, indicando que la difusión es el mecanismo involucrado en el secado de carambola. Los coeficientes difusivos oscilaron entre $7,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (50°C y 0,5 cm) y $41,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (60°C y 1,5 cm). El tiempo de secado osciló entre 2,74 h (60°C y 0,5 cm) y 12,41 h (50°C y 1,5 cm). Los resultados indican que a medida que la temperatura de secado aumenta y el espesor de rodaja disminuye, mayor es la velocidad de secado y menor el tiempo de secado. En conclusión, el espesor de las rodajas tuvo efecto significativo sobre el tiempo de secado, el coeficiente de difusión, los sólidos solubles y el extracto etéreo en el fruto seco. La temperatura afectó significativamente el coeficiente de difusión, las propiedades fisicoquímicas y el análisis proximal del fruto seco.

Palabras clave: Deshidratación, difusión, fisicoquímico, proximal.

INFLUENCE OF THICKNESS AND TEMPERATURE ON DRYING TIME OF CARAMBOLA (*Averrhoa carambola* L.)

Abstract

Carambola slices were dried with different thicknesses (0.5, 1.0 and 1.5 cm) and different dry bulb temperatures (50, 55 and 60°C) using a dehydrator trays. The effect of temperature and thickness on drying time, diffusion coefficient, proximate analysis and physicochemical characteristics of dried fruit were evaluated. Drying curves were constructed from the obtained results; it was observed that drying took place during the decreasing period, proving that diffusion was the mechanism involved in carambola drying. Diffusive coefficients ranged between $7.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (50°C and 0.5 cm) and $41.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (60°C and 1.5 cm). Drying time ranged from 2.74 h (60°C and 0.5 cm) and 12.41 h (50°C and 1.5 cm). The results indicate that as the drying temperature increases and decreases the thickness of slice, the greater the drying rate and the lower the drying time. In conclusion, thickness of the slices had significant effect on drying time, diffusion coefficient, soluble solids and ether extract in dried fruit. Temperature significantly affect the diffusion coefficient, physicochemical properties and proximate analysis of dried fruit.

Key words: Dehydration, diffusion, physicochemical, proximate.

Introducción

La Carambola (*Averrhoa carambola* L.) es un producto catalogado nacional e internacionalmente como un fruto exótico y atractivo desde el punto de vista comercial (Cubillos e Isaza, 1999). Este producto en estado de madurez presenta un alto contenido de humedad (90,69%) (Texeira *et al.*, 2001), por lo que es susceptible a la descomposición por microorganismos, reacciones químicas y enzimáticas.

La continua producción del fruto trae como consecuencia una concentración de materia prima (sobre oferta) durante todo el año, que el mercado local no logra absorber y por consiguiente, se registran pérdidas postcosecha. Para reducir éstas pérdidas, se ha recurrido a la obtención de pulpas y productos derivados de ellos como son las jaleas, mermeladas, néctar, osmodeshidratos (Hernández y Barrera, 2004); sin embargo, las pulpas y productos derivados requieren de otros métodos de conservación como: congelación, refrigeración, empaque aséptico, adición de aditivos, entre otros, siendo costosa la implementación y operación del proceso. También, se han realizado ensayos para la conservación de la Carambola como el glaseado (Cubillos e Isaza, 1999), la osmodeshidratación (Cubillos e Isaza, 1999; Shigematsu *et al.*, 2005; Ruiz-López *et al.*, 2011) y el espumado antes del secado (Karim y Wai, 1999) los cuales resultan igualmente costosos y requieren de una alta inversión inicial.

La aplicación del método de secado, brinda varias ventajas como ahorro por costos de transporte y almacenamiento, debido a que se reduce notablemente el peso y volumen del producto húmedo y posibilita la adquisición y el consumo del fruto en cualquier época del año. Por esta razón, este método se convierte en una alternativa de solución para minimizar las pérdidas postcosecha del fruto y de esta manera potenciar su consumo. Este trabajo puede convertirse en una estrategia de diversificación para el consumo en forma deshidratada; por lo que el objetivo de la presente investigación, fue

evaluar el método de secado por aire caliente como alternativa de conservación de la Carambola.

Materiales y métodos

Este trabajo se desarrolló en la Planta de Frutas y Hortalizas de la Granja Santo Domingo y en los laboratorios de Química y Nutrición de la Universidad de la Amazonia ubicados en Florencia–Caquetá.

Adecuación de los Frutos

La variedad ácida de los frutos de carambola (*Averrhoa carambola* L.) fue adquirida en el comercio local de la ciudad de Florencia. Dichos frutos provienen de granjas y parcelas ubicadas en los alrededores de dicha ciudad. Las condiciones climáticas de esta zona son: humedad relativa (H.R.) del 85%; temperatura entre 28 –32 °C; condiciones propias del bosque húmedo – tropical.

Se seleccionaron frutos sanos, sin magulladuras; con uniformidad en tamaño y color; en estado de madurez 3 (color amarillo opaco) de acuerdo con la carta de colores para la Carambola ácida del Piedemonte Amazónico (González, 2000). Los frutos se sometieron a un proceso de lavado, desinfección y enjuague sumergiéndolos en solución de Hipoclorito de Sodio, con una concentración de 50 ppm, para eliminar la carga microbiana propia de la fruta y finalmente se enjuagó para eliminar residuos de Cloro. Posteriormente, a los frutos se le retiró la epidermis, las aristas y semillas y luego fueron cortados (transversalmente en rodajas con forma de estrella de 0,5; 1,0 y 1,5 cm de espesor) y sumergidos en una solución de Ácido Ascórbico con una concentración de 400 ppm (Fernández y Vargas, 2001) antes de iniciar el proceso, como tratamiento inhibidor del pardeamiento enzimático.

Equipos

El equipo empleado fue un secador de cinco bandejas de acero inoxidable de dimensiones 95 x 96 x 1cm cada una, cada bandeja tiene una capacidad de 10 kg (para frutas con una

densidad promedio de 1150 kg m^{-3}). En este equipo la transferencia de calor se da por convección forzada de aire caliente con un flujo transversal cruzado (Fajardo y Rojas, 1996). Se utilizó una balanza con 0,1 g de precisión (modelo BJ2100D, Precisa, Dietikon, Suiza) y un termohigrómetro (Durotherm con escala de -10 a 70°C y exactitud $\pm 1^\circ\text{C}$; humedad relativa con exactitud $\pm 1\%$).

Caracterización del fruto fresco y seco

Los frutos de Carambola fueron sometidos a pruebas fisicoquímicas (pH, sólidos solubles y acidez titulable) y análisis proximal (humedad, extracto etéreo, proteína total, cenizas y fibra cruda). Se caracterizaron los frutos frescos midiendo pH por potenciometría (AOAC 945.27, 1998), sólidos solubles totales por refractometría (AOAC 932.12, 1998) y acidez total por titulación (AOAC 942.15, 1998). A los frutos frescos y secos se les determinó además, humedad por secado en estufa (AOAC 930.04, 1998), extracto etéreo por método gravimétrico (AOAC 930.09, 1998), proteína total por método Kjeldahl (AOAC 920.152, 1998), cenizas por calcinación (AOAC 940.26, 1998) y fibra cruda por método de digestión (AOAC 930.10, 1998).

Construcción de las curvas de secado

Se evaluó el proceso de secado para Carambola a temperatura de bulbo seco de 50, 55 y 60°C , velocidad del aire de secado de $3,64 \text{ m s}^{-1}$ y espesor de rodajas de 0,5; 1,0 y 1,5 cm. Para cada espesor se pesaron 500 g y se ubicó cada uno en bandejas independientes. Esta cantidad se calculó teniendo en cuenta la cantidad mínima de rodajas de Carambola que caben en cada bandeja, de acuerdo con el diámetro transversal y longitudinal promedio del fruto, el peso promedio y el área de la bandeja. Los datos del proceso de secado (humedad del sólido en función del tiempo) fueron obtenidos periódicamente mediante pesaje de las muestras a intervalos de 15 minutos durante la primera hora de secado y de ahí en adelante se tomaron datos cada hora hasta peso constante; este procedimiento se realizó de igual forma para cada temperatura de secado.

Los niveles de temperatura de bulbo seco fueron establecidos de acuerdo a un estudio de deshidratación de Piña nativa realizado por Hernández y Barrera (2004). Se eligió como referencia la temperatura de secado de la Piña nativa (60°C) porque tiene una humedad del 88%, similar al fruto de Carambola (Hernández *et al.*, 2004). El criterio de selección de los espesores estuvo basado en el estudio para Carambola realizado por Cubillos e Isaza (1999), quienes emplearon espesores de 0,5 y 1,0 cm.

Con el fin de determinar las propiedades del aire de secado se midió la temperatura del bulbo seco y la humedad relativa con un termohigrómetro digital; se midieron las condiciones del ambiente y de la cámara de secado. Las condiciones a la salida del aire se determinaron mediante un balance total de materia, el empleo de la carta psicrométrica y un software para cálculos psicrométricos, asumiendo que el proceso de secado se presenta en condiciones adiabáticas.

Para determinar la cinética de secado, se calculó en cada tiempo el contenido de humedad en base seca y se graficó contra el tiempo. En esta curva se identificaron las zonas continuas y para cada una se estableció la ecuación de regresión con el coeficiente de correlación (r^2) mayor. Luego se derivó respecto al tiempo cada ecuación de regresión y se calculó la velocidad o flux de secado para cada tiempo de acuerdo con Treybal (1995). Para construir la curva de secado se graficó la velocidad de secado contra el contenido de humedad en base seca. Para calcular el tiempo de secado en el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente, se emplearon las ecuaciones presentadas por Treybal (1995).

Proceso de modelado

Se utilizó el modelo difusional para modelar el periodo de velocidad decreciente en el secado de carambola. Este método ha sido utilizado en *Artocarpus integer* (Chong *et al.*, 2008), Banano (Nguyen y Price, 2007; Fernando *et al.*, 2011), Cacao en grano (MacManus *et al.*,

2010), Casabe y Calabaza (Fernando *et al.*, 2011), Copoazú (Giraldo-Zuniga *et al.*, 2010), Ñame (Montes *et al.*, 2008) y Pimiento Rojo (Vega *et al.*, 2005), entre otros.

Se utilizó la ecuación integrada de la segunda ley de Fick (Ecuación 1) para tiempos largos y geometría plana en una dimensión:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_f \pi^2 t}{4 L^2}\right) \quad (1)$$

Donde MR es la razón de humedad removida, X es contenido de humedad (base seca) en el tiempo t , X_e es contenido de humedad de equilibrio (base seca), X_o es la humedad inicial (base seca), t es el tiempo de secado en horas, L es el semiespesor de la lámina (m) y D_f es el coeficiente de difusión ($m^2 s^{-1}$). La ecuación (1) puede reescribirse como:

$$MR = A \cdot e^{-Kt} \quad (2)$$

$$K = \frac{-D_f \pi^2}{4 L^2} \quad (3)$$

Donde K es una constante de secado (h^{-1}) y A es una constante adimensional. El valor K se obtienen de la pendiente de la línea recta obtenida al graficar el $\ln MR$ en función del tiempo de secado en horas, de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2). El coeficiente difusional (D_f) se calcula a partir de la ecuación (3).

Para aplicar la ecuación (1) la variable relevante es el contenido de humedad de equilibrio (X_e). Como en la literatura no hay reporte de ecuaciones empíricas para calcular X_e para Carambola, se empleó un método empírico para estimación de contenido de humedad de equilibrio presentado por Nguyen y Price (2007). En este método el equilibrio es alcanzado cuando la velocidad de secado es cero ($dX/dt = 0$). El contenido de humedad de equilibrio (X_e) es el punto en el cual la gráfica dX/dt vs. X corta el eje del contenido de humedad (X). Esta aproximación puede ser aplicada cuando el tiempo de secado es prolongado y puede aproximarse X_e .

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se empleó un diseño completamente aleatorio en arreglo factorial con dos factores; la temperatura en tres niveles (50, 55 y 60°C) y el espesor en tres niveles (0,5; 1,0 y 1,5 cm) con dos repeticiones por tratamiento. A las variables dependientes se les chequeó previamente la aleatoriedad, la normalidad y la homogeneidad de varianza. Todas las variables fueron sometidas a análisis de varianza (ANOVA) al 95% de confiabilidad, a través de un modelo de dos vías (temperatura y espesor) con interacciones. Las medias fueron comparadas usando el test de Duncan con 5% de significancia; de igual forma el análisis de varianza permitió determinar la incidencia de la temperatura y el espesor sobre el tiempo de secado, el coeficiente de difusión, las características fisicoquímicas y el análisis proximal del fruto seco. Todos los datos fueron procesados y evaluados usando el sistema gráfico estadístico Statgraphics Plus (Statgraphics Plus 5.0, 2000).

Resultados y discusión

Caracterización del fruto fresco

En el cuadro 1 se presentan los resultados del análisis fisicoquímico y proximal realizado al fruto de Carambola fresca, con y sin tratamiento de Ácido Ascórbico. Para el fruto sin tratamiento los valores para pH, acidez total, contenido de humedad y el análisis proximal fueron similares a los reportados por Texeira *et al.* (2001) para la variedad Golden Star introducida y propagada en la Estación Experimental de Citricultura - Universidade Estadual Paulista en São Paulo, Brasil.

Los sólidos solubles medidos son inferiores a los reportados por Texeira *et al.* (2001) para la variedad Golden Star, pero coinciden con valores inferiores a 5°Brix reportado por Palacios y Rodríguez (2001). Según Hernández *et al.* (2004) la diferencia en el contenido de sólidos solubles pueden ser resultado de diferencias en el clima, la nutrición y la carga del árbol, puesto que dichos factores influyen en la acumulación de sólidos solubles.

Cuadro 1. Análisis fisicoquímico y proximal de frutos frescos de Carambola variedad ácida.

Componente	Unidad	Tratamiento en el fruto seco	
		Sin Ácido Cítrico	Ácido cítrico 400 ppm
Acidez total	% Ácido cítrico	0,41	0,62
pH		3,85	3,54
Sólidos solubles	°Brix	3,6	4,8
Humedad	% b.h. (base húmeda)	93,06	94,01
Extracto etéreo	% b.s. (base seca)	3,88	4,56
Proteína	% b.s.	6,13	6,56
Cenizas	% b.s.	4,14	4,12
Fibras cruda	% b.s.	31,92	30,65
ENN (extracto no nitrogenado)	% b.s.	53,93	54,11

Cinética de secado de Carambola con aire caliente

En el cuadro 2 se presentan los tiempos de secado de Carambola para las condiciones estudiadas. Sin importar la temperatura al disminuir el espesor de la rodaja disminuyó significativamente el tiempo de secado ($p=0,0098$), específicamente entre los espesores de 1,5 cm y 0,5 cm, con un tiempo 60% menor en promedio. Resultados similares fueron encontrados para Banano (Nguyen y Price, 2007; Fernando *et al.*, 2011), Casave y Calabaza (Fernando *et al.*, 2011), Mango (Pott *et al.*, 2005), Manzana (Zhu *et al.*, 2010) y Marañón (Machado *et al.*, 2010).

En cuanto a la influencia de la temperatura sobre el tiempo de secado sin importar el espesor de la muestra, el tiempo de secado se redujo casi a la mitad cuando se trabajó a 60°C, aunque no fue estadísticamente significativo.

Cuadro 2. Tiempo de secado de rodajas de Carambola con diferentes espesores y temperaturas.

Temperatura (°C)	Espesor (cm)	Tiempo de secado (h)
60	0,5	2,74 ± 0,097
	1,0	4,71 ± 0,072
	1,5	7,09 ± 0,039
55	0,5	4,45 ± 0,226
	1,0	9,45 ± 0,237
	1,5	11,26 ± 0,055
50	0,5	5,39 ± 0,034
	1,0	11,52 ± 0,111
	1,5	12,41 ± 0,129

Este comportamiento está de acuerdo con los resultados encontrados para otros frutales (Karim y Wai, 1999; Pott *et al.*, 2005; Kaya *et al.*, 2007; Nguyen y Price, 2007; Thuwapanichayanan *et al.*, 2008; Giraldo-Zuniga *et al.*, 2010).

En la figura 1 se determina que durante la primera hora de secado (depende del espesor y la temperatura), la humedad libre decrece linealmente ($R^2 > 0,98$), esto es, dX/dt es una constante, al igual que la velocidad de secado para este mismo periodo de tiempo. Como era de esperarse al incrementarse la temperatura se incrementó la velocidad de secado.

Con el fin de describir el comportamiento del secado de Carambola, y predecirlo bajo diferentes condiciones, es necesario modelar el proceso de secado. El secado sigue predominantemente un perfil de velocidad descendente. Según Nguyen y Price (2007) la transferencia de masa durante el periodo de velocidad decreciente es causada por la difusión del líquido o el flujo capilar. La difusión es utilizada comúnmente para describir el comportamiento del secado en el periodo de velocidad decreciente de frutas y vegetales. Para modelar el comportamiento del secado en el periodo de velocidad decreciente se aplica la ley de difusión de Fick, donde la tasa de difusión es gobernada por el gradiente de concentración de humedad como fuerza impulsora.

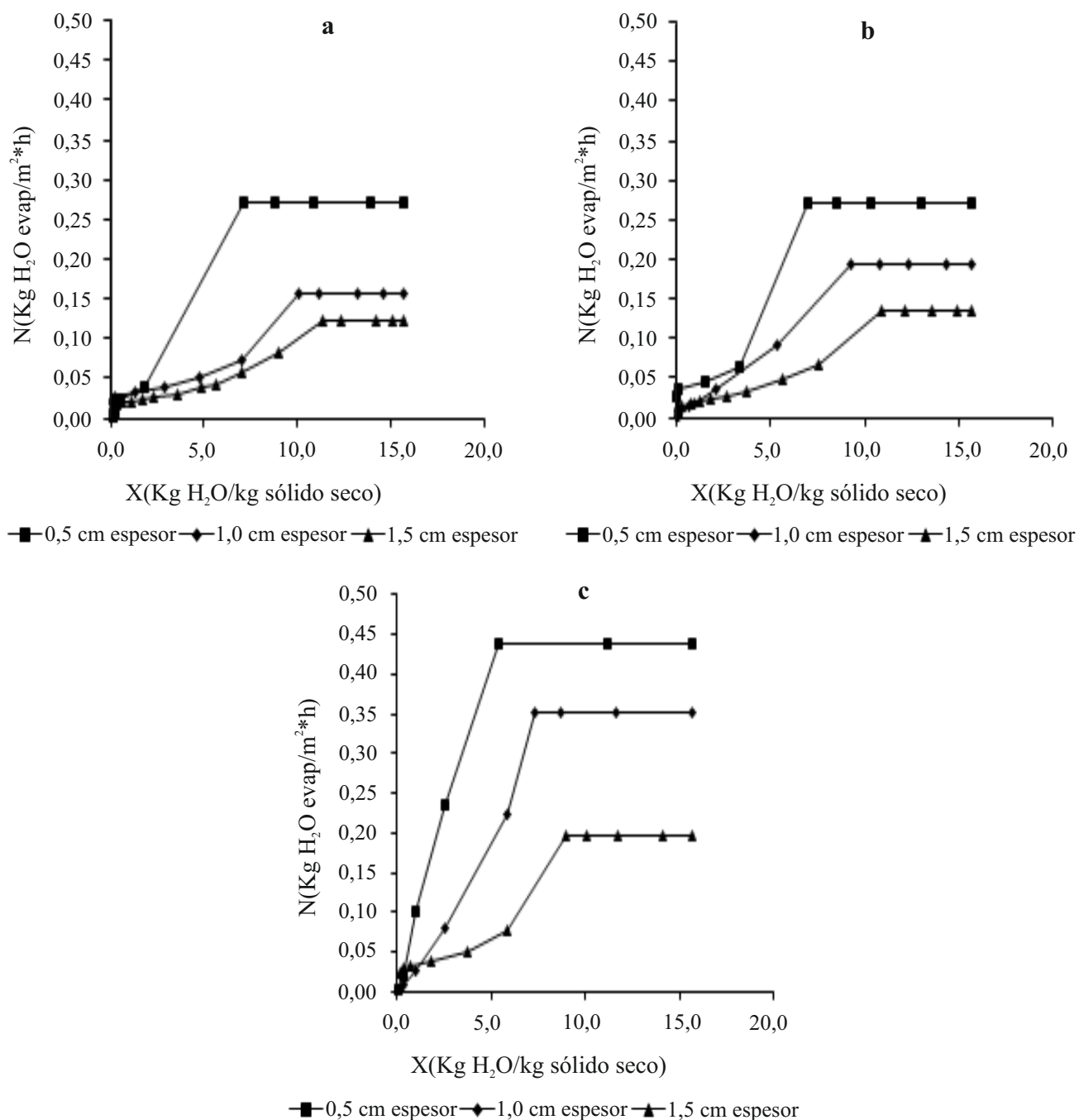


Figura 1. Secado de Carambola a diferentes temperaturas: a) 50°C; b) 55°C c) 60°C.

Los contenidos de humedad de equilibrio para todas las condiciones de secado trabajadas en este estudio se resumen en el cuadro 3. La Figura 2 muestra la gráfica de $\ln MR$ vs. tiempo para rodajas de carambola de 1,5 cm de espesor a las diferentes temperaturas. La relación lineal de $\ln MR$ vs. tiempo indica que D_f es independiente del contenido de humedad

($R^2 > 0,9$ en todos los casos). En general, se observó un incremento de D_f con el incremento de la temperatura y el espesor, estos resultados coinciden con los reportados para Banano (Nguyen y Price, 2007; Fernando *et al.*, 2011), Casave y Calabaza (Fernando *et al.*, 2011) y Manzana (Zhu *et al.*, 2010).

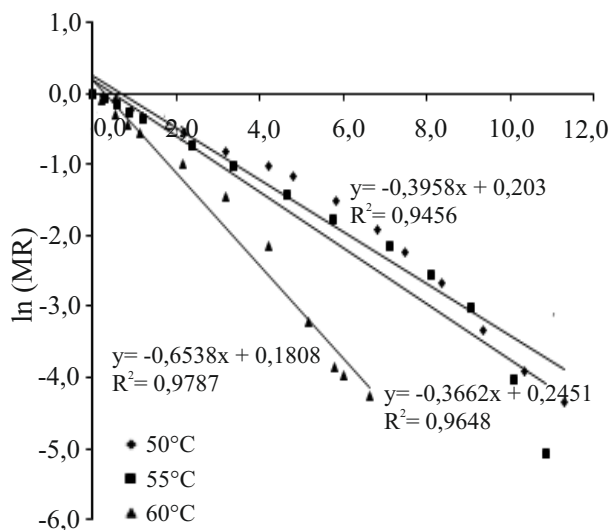
Cuadro 3. Humedad de equilibrio Xe (kg H₂O kg⁻¹ sólido seco) de Carambola a diferentes condiciones de secado.

Condiciones de secado		Xe (kg H ₂ O kg ⁻¹ sólido seco)
Temperatura	Espesor	
50°C	0,5	0,0637
	1,0	0,0447
	1,5	0,0733
55°C	0,5	0,0266
	1,0	0,0257
	1,5	0,0559
60°C	0,5	0,0216
	1,0	0,0034
	1,5	0,0401

Los valores de las constantes de secado (K) y los coeficientes de difusión calculados para las diferentes condiciones de secado se resumen en el cuadro 4. Estos valores Cacao en el rango 1×10^{-9} y 1×10^{-11} m² s⁻¹ (Madamba *et al.*, 1996), el cual es reportado para la mayoría de alimentos.

Efecto de la temperatura en la cinética de secado

El efecto de la temperatura en la velocidad de secado se detalla en los resultados de difusividad del agua presentados en el cuadro 4. Al incrementar la temperatura se incrementó significativamente ($p = 0,0323$) el coeficiente de difusión; los coeficientes de difusión a 60°C

**Figura 2.** ln MR vs. Tiempo para rodajas de Carambola de 1,5 cm de espesor a 50°C, 55°C y 60°C.**Cuadro 4.** Constantes de secado y los coeficientes de difusión para secado de Carambola a diferentes condiciones.

Condiciones de secado		K (h ⁻¹)	Df (m ² s ⁻¹) X 10 ¹⁰
Temperatura	Espesor		
50°C	0,5	-1,109	7,80
	1,0	-0,655	18,40
	1,5	-0,366	23,20
55°C	0,5	-1,123	7,90
	1,0	-0,634	17,90
	1,5	-0,396	25,10
60°C	0,5	-1,942	13,70
	1,0	-0,950	26,70
	1,5	-0,654	41,40

fueron significativamente mayores y esto explica por qué la velocidad de secado a 60°C fue mayor respecto a las otras temperaturas evaluadas (Figura 2). Estos resultados coinciden con los encontrados para *Artocarpus integer* (Chong *et al.*, 2008), Copoazú (Giraldo-Zuniga *et al.*, 2010), granos de Cacao (MacManus *et al.*, 2010), Manzana (Kaya *et al.*, 2007), Pimiento rojo (Vega *et al.*, 2005) y plátano (Johnson *et al.*, 1998).

La velocidad de secado inicial y el tiempo de secado necesario para lograr una pérdida de agua del 70% (b.s.) a diferentes temperaturas de secado se muestran en el cuadro 5. El tiempo de secado de Carambola a 60°C fue la mitad del tiempo empleado a 50°C y el 60% del tiempo empleado a 55°C. El tiempo de secado descendió alrededor de media hora con un incremento de 5°C y alrededor de 1,7 horas con un incremento de 10°C.

Influencia del espesor de la muestra en la cinética de secado de Carambola

La velocidad de secado en el periodo de velocidad decreciente está principalmente influenciada por el gradiente de humedad en el alimento (Strumillo y Kudra, 1986), pero además es dependiente del espesor. El cuadro 4 muestra los coeficientes de difusión para espesores de 0,5, 1,0 y 1,5 cm secados a diferentes temperaturas. Los valores de D_f para 1,5 cm fueron tres veces superiores a los obtenidos a 0,5 cm y 1,3 veces superiores con

Cuadro 5. Comparación de la velocidad de secado inicial y el tiempo de secado para alcanzar pérdida de agua del 70% para secado de Carambola a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	50	55	60
Velocidad de secado inicial (kg H ₂ O evap/m ² *h)	0,184	0,201	0,329
Tiempo de secado (min) para alcanzar pérdida de agua del 70%	200	166	99

respecto a 1,0 cm, para todas las temperaturas. Este comportamiento fue confirmado por el análisis de varianza que mostró un aumento significativo ($p=0,0055$) en los coeficientes de difusión al aumentar el espesor. Estos resultados coinciden con otros estudios realizados en Banano (Nguyen y Price, 2007; Fernando *et al.*, 2011), Casave y Calabaza (Fernando *et al.*, 2011) y Manzana (Zhu *et al.*, 2010). En contraste, Machado *et al.* (2010) encontró para secado de Marañón que al aumentar el espesor disminuye el coeficiente de difusión.

Caracterización del fruto seco

En el cuadro 6 se presenta el análisis fisicoquímico realizado a los frutos de Carambola secos. Después del secado disminuyó el pH, aumentó marcadamente la acidez y disminuyeron los sólidos solubles (Cuadro 1). El aumento de acidez coincide con lo encontrado para Uvas pasas (Carranza-Concha *et al.*, 2011), pero contrasta con lo encontrado para Pimiento verde (Faustino *et al.*, 2007). La disminución en los sólidos solubles después del secado fue encontrada en Pimiento verde (Faustino *et al.*, 2007), pero en Uvas pasas (Carranza-Concha *et al.*, 2011) y Papa dulce (Grabowski *et al.*, 2008) los sólidos solubles se incrementaron.

En los frutos secos, la acidez se incrementó significativamente ($p=0,0006$) con el aumento de la temperatura, consecuentemente el pH se redujo de forma significativa ($p=0,0016$). A 60°C la acidez fue significativamente mayor y el pH significativamente menor; respecto al espesor, ni la acidez ni el pH presentaron

cambios significativos. Este incremento en la acidez pudo deberse a la formación de ácidos debido a la interconversión de azúcares y otras reacciones químicas (Clydesdale *et al.*, 1972), las cuales se aceleran a alta temperatura (Rao y Roy, 1980). Estos resultados coinciden con los encontrados para *Embllica officinalis* (Pragati *et al.*, 2003), en contraposición en el secado de Ajo se ha encontrado que la acidez disminuye al aumentar la temperatura (Mota *et al.*, 2010); esta diferencia puede deberse a que en el Ajo hay una gran cantidad de ácidos volátiles que se evaporan a alta temperatura (Mota *et al.*, 2010).

El contenido de sólidos solubles en el fruto seco disminuyó significativamente con el incremento del espesor ($p=0,016$) y la temperatura ($p=0,0083$). A 50°C y 0,5 cm de espesor el contenido de sólidos solubles fue significativamente mayor. Es probable que este comportamiento se deba a que a mayor temperatura parte de los azúcares sufren transformación a otras sustancias como aldehídos (Pragati *et al.*, 2003), igualmente al incrementarse el espesor se incrementa el tiempo de exposición al calor y por lo tanto, se incrementan este tipo de reacciones sobre parte de los azúcares. La disminución de sólidos solubles con el incremento de la temperatura de secado ha sido encontrada en el secado de Ajo (Mota *et al.*, 2010) y *Embllica officinalis* (Pragati *et al.*, 2003).

El contenido de humedad en los frutos secos aumentó significativamente ($p=0,007$) con el aumento de la temperatura, siendo significativamente mayor a 60°C. En cuanto al espesor la humedad no presentó cambios significativos. Este comportamiento se presentó probablemente porque durante un secado lento (baja temperatura) la humedad tiene más tiempo para migrar hacia la superficie; además a alta temperatura se presenta pronto el fenómeno de endurecimiento de la superficie que impide a la humedad terminar de salir.

El contenido final de humedad durante el secado a 50°C fue de 4% (b.h.) en promedio y para el secado a 55°C fue del 7%. Estos resultados se acercan a lo reportado por Karim y

Cuadro 6. Análisis fisicoquímico de frutos secos de Carambola variedad ácida.

Temperatura (°C)	Espesor (cm)	% Acidez (b.h.)	pH	SST (°Brix)	% Humedad (b.h.)
50	0,5	3,51	2,83	4,0	2,81
	1,0	3,44	2,97	3,4	4,59
	1,5	2,80	2,98	3,0	4,63
55	0,5	3,36	2,69	3,1	7,31
	1,0	3,30	2,71	2,9	6,71
	1,5	3,28	2,94	2,6	9,08
60	0,5	5,20	2,34	3,0	13,35
	1,0	5,17	2,37	2,6	14,66
	1,5	5,16	2,38	2,5	10,96

Wai (1999) para secado de puré espumado de Carambola. En contraste, el secado a 60°C logró un producto final con 13% de humedad, que no es necesariamente inadecuado para almacenamiento pues la Carambola osmodeshidratada tiene un contenido de humedad alrededor del 30% (Hernández y Barrera, 2004; Ruiz-López *et al.*, 2011). Sin embargo, es necesario realizar una prueba de vida de anaquel para establecer cuál es el contenido final de humedad adecuado.

En el cuadro 7 se presenta el análisis proximal para los frutos de Carambola después del secado. En el fruto de Carambola seco la proporción de los diferentes componentes como fibra, ceniza ó proteína no presentaron variación significativa, pues los niveles de estas sustancias no dependen tanto de la temperatura de secado sino de la naturaleza del fruto de Carambola. Este comportamiento fue confirmado por el análisis estadístico, ya que el contenido de proteína, fibra cruda y cenizas no

presentaron variaciones significativas respecto a la temperatura o el espesor. Estos resultados coinciden con los encontrados para Ñame (Hsu *et al.*, 2003) y Papa dulce (Grabowski *et al.*, 2008).

El extracto etéreo en la Carambola disminuyó marcadamente después del secado, probablemente porque altas temperaturas favorecen reacciones de oxidación de las diversas sustancias que conforman el extracto etéreo. Este comportamiento coincide con el encontrado para Papa dulce (Grabowski *et al.*, 2008) y Pimiento verde (Faustino *et al.*, 2007).

En los frutos secos de Carambola se encontró que el extracto etéreo aumentó significativamente con el incremento del espesor ($p= 0,0052$) y la temperatura ($p= 0,0023$). El extracto etéreo para un espesor de 1,5 cm y 60°C fue significativamente mayor. Este comportamiento puede deberse a que a altas temperaturas el tiempo de exposición al

Cuadro 7. Análisis proximal (b.s.) de frutos frescos de Carambola variedad ácida.

Temperatura (°C)	Espesor (cm)	% Extracto etéreo	% Proteína	% Ceniza	% Fibra cruda	% E.N.N
50	0,5	0,33	5,88	3,56	31,24	58,99
	1,0	0,36	6,00	3,55	30,68	59,41
	1,5	0,49	6,13	3,38	30,34	59,66
55	0,5	0,35	7,23	3,46	31,10	57,86
	1,0	0,38	6,78	3,39	30,78	58,67
	1,5	0,57	6,14	3,49	30,69	59,11
60	0,5	0,53	7,12	3,18	35,04	54,13
	1,0	0,64	7,41	3,48	31,54	56,93
	1,5	0,85	6,78	3,65	28,83	59,89

calor es menor y por lo tanto, se reduce la proporción del extracto etéreo que se oxida. Adicionalmente, con un espesor mayor hay menos posibilidades de sobrecalentamiento de la rodaja, por lo que el daño a los componentes del extracto etéreo se reduce.

El espesor de las rodajas tuvo efecto significativo sobre el tiempo de secado, el coeficiente de difusión, los sólidos solubles y el extracto etéreo en el fruto seco. Al aumentar el espesor aumentaron los coeficientes de difusión, el tiempo de secado y el extracto etéreo en el fruto seco. Al disminuir el espesor en el fruto seco disminuyeron los sólidos solubles.

La temperatura afectó significativamente el coeficiente de difusión, las propiedades fisicoquímicas y el análisis proximal del fruto seco. Al aumentar la temperatura aumentaron los coeficientes de difusión, la acidez, la humedad y el extracto etéreo en el fruto seco. Al disminuir la temperatura aumentó el pH y los sólidos solubles del fruto seco.

El secado de Carambola sigue predominantemente un perfil de velocidad descendente. Los coeficientes de difusión obtenidos coinciden con los rangos reportados en literatura. La diferencia en las velocidades de secado para rodajas de diferente espesor mostró que el secado de Carambola presenta transferencia de humedad interna en el periodo de velocidad decreciente, en el cual la difusividad del agua depende de la temperatura y la distancia (espesor).

Agradecimientos

Al convenio Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI-Universidad de la Amazonia por el préstamo del secador de bandejas. Al investigador del Instituto Sinchi Jaime Alberto Barrera por sus contribuciones, al personal de los Laboratorios de Biología y Química de la Universidad de la Amazonia y a los docentes del programa de Ingeniería de Alimentos que contribuyeron en este trabajo.

Literatura citada

AOAC. Association of Oficial Analytical Chemist. 1998. Oficial methods of analisis., 16th edition. Washington.

Carranza-Concha, J; Benlloch, M; Camacho, MM; Martínez-Navarrete, N. 2011. Effects of drying and pretreatment on the nutritional and functional quality of raisins. Food Bioproducts Process (en prensa).

Chong, CH; Law, CL; Cloke, M; Hii, CL; Abdullah, LC; Daud, WRW. 2008. Drying kinetics and product quality of dried Chempedak. Journal of Food Engineering 88: 522–527.

Clydesdale, FM; Lin YD; Francis, FJ. 1972. Formation of 2-pyrrolidone-5-carboxylic acid from glutamine during processing and storage of spinach puree. J Food Sci 37: 45.

Cubillos, C; Isaza, H. 1999. Obtención de un producto glaseado y un producto osmodeshidratado de Carambola (*Averrhoa carambola* L.) en el piedemonte caqueteño. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería de Alimentos, Universidad de la Salle. Instituto Amazónico de Investigaciones-SINCHI, Bogotá.

Fajardo, VA; Rojas, CA. 1996. Diseño y construcción de un deshidratador por aire caliente para productos amazónicos. Convenio Instituto Amazónico de investigaciones científicas SINCHI-Instituto de Ciencia y tecnología de Alimentos ICTA, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Santafé de Bogotá D.C.

Faustino, JMF; Barroca, MJ; Guine, RPF. 2007. Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization. Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing 85(C3): 163–170.

Fernández, CP; Vargas, LY. 2001. Evaluación de procesos de conservación de la carambola (*Averrhoa carambola* L.). Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Área de Ingeniería de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 56 p.

Fernando, WJN.; Low, HC; Ahmad, AL. 2011. Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in

convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. *Journal of Food Engineering* 102: 310–316.

Giraldo-Zuniga, AD; Arévalo-Pinedo, A; Silva, AF; Silva, PF; Valdes-Serra, JC; Pavlak, MC de M. 2010. Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciênc. Tecnol. Aliment* 30(1): 179-182.

González, DV. 2000. Análisis del desarrollo de la fase reproductiva y determinación de parámetros de recolección de carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad ácida, producida en el Piedemonte Amazónico Colombiano. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Instituto Amazónico de Investigaciones SINCHI, Bogotá. 121 p.

Grabowski, JA; Truonga, VD; Daubert, CR. 2008. Nutritional and rheological characterization of spray dried sweetpotato powder. *LWT* 41: 206–216.

Hernández, MS; Barrera, JA. 2004. Bases Técnicas para el Aprovechamiento Agroindustrial de Especies Nativas de la Amazonia. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI. Universidad de la Amazonia. Bogotá, Colombia. 101 p.

Hernández, MS; Barrera, JA; Paéz, D; Oviedo, E; Romero, H. 2004. Aspectos Biológicos y Conservación de Frutas Promisorias de la Amazonia Colombiana. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI. Universidad de la Amazonia. Bogotá, Colombia. 148 p.

Hsu, C; Chen, W; Weng, Y; Tseng, C. 2003. Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods. *Food Chemistry* 83: 85–92.

Johnson, PNT; Brennan, JG; Addo-Yobo, FY. 2004. Air-drying Characteristics of Plantain (*Musa AAB*). *Journal of Food Engineering* 3: 233-242.

Karim, AA; Wai, CC. 1999. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) purée. Stability and air drying characteristics. *Food Chemistry* 64: 337-343.

Kaya, A; Aydın, O; Demirtas, C. 2007. Drying Kinetics of Red Delicious Apple. *Biosystems Engineering* 96(4): 517–524.

Engineering 96(4): 517–524.

Machado, AV.; Oliveira, EL; Santos, ES; Oliveira, JA. 2010. Estudio del Secado de Anacardo (*Anacardium occidentale* L.) mediante Secador Solar de Radiación Directa. *Información Tecnológica* 21(1): 31-37.

MacManus, N; Ogunlowo, AS; Olukunle, OJ. 2010. Cocoa bean (*Theobroma cacao* L.) drying kinetics. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70(4): 633-639.

Madamba, PS; Driscoll, RH; Buckle, KA. 1996. The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering* 29: 75–97.

Montes, EJ; Torres, R; Andrade, RD; Pérez, OA; Marimon, JL; Meza, II. 2008. Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Revista Ingeniería e Investigación* 28(2): 45-52.

Mota, CL; Luciano, C; Dias, A; Barroca, MJ; Guiné, RPF. 2010. Convective drying of onion: Kinetics and nutritional evaluation. *Food and Bioproducts Processing* 88: 115–123.

Nguyen, M; Price, WE. 2007. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering* 79: 200–207.

Palacios, CA; Rodríguez, E. 2001. Evaluación de la aplicación de atmósfera modificada en la conservación de la carambola (*Averrhoa carambola* L.). Trabajo de grado. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. Bogotá. 115 p.

Pott, I; Neidhart, S; Mühlbauer, W; Carle R. 2005. Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 6: 412 – 419.

Pragati, S; Dahiya, S; Dhawan, SS. 2003. Effect of drying methods on nutritional composition of dehydrated aonla fruit (*Emblica officinalis* Garten) during storage. *Plant Foods for Human Nutrition* 58: 1–9.

Rao, VS; Roy, SK. 1980. Studies on dehydration of mango pulp: Standardization for making mango

sheetleather. Indian Food Packer 34: 72.

Ruiz-López, II; Ruiz-Espinosa, H; Herman-Lara, E; Zárate-Castillo, G. 2011. Modeling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydrated carambola (*Averrhoa carambola* L.) in sugar solutions. Journal of Food Engineering 104: 218–226.

Shigematsu, E; Eik, NM; Kimura, M; Mauro, M. A. 2005. Influência de pré-tratamentos sobre a desidratação osmótica de carambolas. Ciência e Tecnologia de Alimentos 25: 536–545.

Statgraphics plus 5.0. 2000. Statistical Graphics Corp. Rockville, MA, USA.

Strumillo, C; Kudra, T. 1986. Drying principles, applications and design. New York: Gordon and Breach. 448 p.

Teixeira, GH de A; Durigan, JF; Donadio, LC; Silva, JAA. 2001. Caracterização Pós-colheita de Seis Cultivares de Carambola (*Averrhoa carambola* L.). Rev. Bras. Frutic. 23 (3): 546-550.

Treybal, RE. 1995. Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición. Ed. Mc Graw-Hill. México. 858 p.

Thuwapanichayanan, R; Prachayawarakorn, S; Soponronnarit, S. 2008. Drying characteristics and quality of banana foam mat. Journal of Food Engineering 86: 573–583.

Vega, A; Andrés, A; Fito, P. 2005. Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annuum* L. cv Lamuyo). Información tecnológica 16 (6): 3-11.

Zhu, Y; Pan, Z; McHugh, TH; Barrett, DM. 2010. Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating. Journal of Food Engineering 97: 8–16.

Claudia Hernández Londoño

Ingeniera Química y Magíster en Ciencias-Biología de la Universidad Nacional de Colombia. Docente ocasional tiempo completo de la Universidad de la Amazonia. Su área de trabajo es la Ingeniería de Procesos y Fisiología de Frutales. Pertenece al grupo de investigación en Ingeniería de los Procesos Alimenticios INGEPRAL. Ha colaborado en algunos proyectos de investigación en frutales con el Instituto Sinchi.

Autor para correspondencia

E-mail: cehernandez@uniamazonia.edu.co

Zonia Karina Ossa

Ingeniera de Alimentos de la Universidad de la Amazonia. Pertenece al grupo de investigación en Ingeniería de los Procesos Alimenticios INGEPRAL.

Lorena Ramírez Perdomo

Ingeniera de Alimentos de la Universidad de la Amazonia. Pertenece al grupo de investigación en Ingeniería de los Procesos Alimenticios INGEPRAL.

Wilmer Herrera Valencia

Biólogo de la Universidad de la Amazonia. Magister en Gestión de Recursos Naturales de la Universidad Federal del Pará (Brasil). Investigador de la corporación Misión Verde Amazonia. Su área de trabajo es la Gestión y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Pertenece al grupo de Investigación en Mitigación de Cambio Climático en la Amazonia GIMCCA.